

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Используемые ГОСТы	4
2. Входные данные	5
3. Теоретическая часть	6
3.1 Методы получения АП, их достоинства и недостатки	6
3.2 Асферизация термическим испарением в вакууме	8
3.2.1 Физическая сущность метода	9
3.2.2 Описание вакуумной установки для асферизации	10
3.2.3 Принцип действия вакуумной установки	11
3.3 Методика расчета распределения толщины асферизирующего покрытия по круговым зонам поверхности подложки	13
3.3.1 Расчет четырехточечной сферы сравнения.	14
3.3.2 Расчет распределение толщины съема или нанесения материала асферической поверхности детали	15
3.4 Методика расчета маски	16
4. Практическая часть	22
4.1 Чертеж оптической детали	24
4.1.1 Таблица параметров к чертежу	24
4.1.2 Информация об основном чертеже	27
4.2 Результаты расчетов	27
4.2.1 Расчет распределения толщины напыления	27
4.2.2 Расчет маски	31
4.3 Чертеж маски	33
5. Выводы	34
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	36
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	41

1. Используемые ГОСТы

ГОСТ 2.412-81 Единая система конструкторской документации.
Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации.
Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.

ГОСТ 26148-84 Фотометрия. Термины и определения.

ГОСТ 7427-76 Геометрическая оптика. Термины, определения и
буквенные обозначения.

ГОСТ 11141-84 Детали оптические. Классы чистоты поверхностей.
Методы контроля.

ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и
характеристики.

ГОСТ 23136-93 Материалы оптические. Параметры

2. Входные данные

Исходными данными для данной курсовой работы являются:

1. Вариант № 4
2. Принадлежность оптической системы – объектив для УФ области спектра астрономического телескопа
3. Параметр уравнения АП $A_1 = 642$
4. Параметр уравнения АП $A_2 = -0.35$
5. Внешний световой диаметр АП $D_{\text{св}} = 105$
6. Внутренний световой диаметр АП $D_0 = 45$
7. Знак кривизны АП – выпуклая
8. Толщина по оси АП – 7
9. Расстояние S от диафрагмы испарителя до вершины АП – 480
10. Расстояние Δ от плоскости маски до вершины АП – 50

Пример выбранной линзы в варианте представлен на рис. 1.



Рис. 1 - Пример выпуклой линзы для астрономического телескопа

3. Теоретическая часть

В теоретической части описываются основные методы получения асферических поверхностей (АП), их достоинства и недостатки. Из списка методов выбран метод асферизации термическим испарением в вакууме, описана его физическая сущность, установка для работы и принцип действия.

В разделе 2.3 дана методика расчета распределения толщины асферизируемой поверхности покрытия по круговым зонам поверхности подложки. В разделе 2.4 приведена методика расчета маски.

3.1 Методы получения АП, их достоинства и недостатки

Основными методами получения АП согласно [1] являются:

1. Пластическое изменение формы заготовки
2. Использование упругих свойств материала заготовки
3. Нанесение на базовую поверхность дополнительного слоя вещества
4. Удаление с заготовки избыточного слоя материала



Рис. 2 - Методы получения АП

Пластическое изменение формы заготовки реализуется путем получения деталей из стекла и пластмасс литьем под давлением, прессованием, моллированием, центробежной параболизацией. Эти способы отличает высокая производительность и экономия материала.

Изготовление асферических поверхностей при использовании упругих свойств материала заготовки обеспечивается шлифованием и полированием предварительно деформированной (в пределах упругости) заготовки с плоской или сферической поверхностью. Деформированная поверхность обрабатывается под плоскость или сферу. После прекращения действия источника деформации поверхность получается асферической.

Нанесение на базовую поверхность (сферу или плоскость) дополнительного слоя вещества является перспективным способом изготовления асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы или плоскости. Асферизация выполняется нанесением на базовую поверхность, находящуюся в вакууме, путем распыления нужного слоя вещества, например, алюминия, сульфида цинка, монооксида кремния. Переменная толщина слоя вещества обеспечивается применением вращающихся масок с фигурными вырезами (вращаться могут и детали).

Четвертое направление является наиболее распространенным и универсальным. Оно реализуется различными способами при использовании операций точения, фрезерования, шлифования, полирования и др.

Методы обработки асферических поверхностей, относящиеся к этому направлению, могут быть реализованы двумя путями:

1. За счет обработки оптических поверхностей с использованием их геометрических свойств для обеспечения условий притира (методы, аналогичные «классическому»);
2. За счет обработки оптических поверхностей без использования их геометрических свойств для обеспечения условий притира (методы, отличные от «классического»).

Одним из развивающихся направлений получения асферической оптики является выявление и использование геометрических свойств обрабатываемых поверхностей, обеспечивающих взаимный притир инструмента и заготовки, который аналогичен способу, используемому для получения сферических и плоских поверхностей.

Например, широко известный способ обработки АП второго порядка ножевым инструментом основан на том, что сечения этих поверхностей, проходящие через фокус, имеют постоянный радиус кривизны при вершине

Другим известным способом получения АП, основанным на их геометрических свойствах, является обработка АП второго порядка трубчатым инструментом. Схема способа основана на использовании плоских сечений этих поверхностей, проходящих через вершины, которые представляют собой эллипсы.

3.2 Асферизация термическим испарением в вакууме

Сущность метода вакуумной асферизации заключается в том, что на полированную сферическую или плоскую поверхность (подложку) наносится слой вещества переменной толщины. Нанесение слоя осуществляется в вакууме путем осаждения на подложку испаряемого вещества. Необходимое изменение толщины слоя по зонам асферизируемой поверхности обеспечивается маской — экраном с фигурным отверстием. В процессе испарения вещества деталь, на поверхность которой наносится слой, вращается вокруг своей оси. Изменение толщины слоя по зонам достигается тем, что время открытия отдельных зон для прохождения осаждаемого вещества неодинаково и зависит от формы вырезов в маске.

Метод вакуумной асферизации является противоположностью механическим способам изготовления АП, так как последние основаны на удалении лишнего материала. Это придает определенные преимущества методу вакуумной асферизации: например, можно выбирать различные вещества слоев, как прозрачные, так и непрозрачные, а в случае брака слой

можно удалить без повреждения подложки.

Основное преимущество метода заключается в том, что он позволяет изготавливать АП любого вида, в том числе несимметричные. Метод имеет сравнительно высокую воспроизводимость: при установившемся режиме работы вакуумной установки отклонение толщины получаемого слоя не превышает 1%; при слое толщиной 20 мкм это отклонение составляет 0,2 мкм, что соответствует одному интерференционному кольцу при контроле АП пробным стеклом.

Поскольку наиболее распространенный допуск на качество оптических поверхностей составляет два-три интерференционных кольца, то метод вакуумной асферизации вполне пригоден для изготовления высокоточных АП. Для вакуумной асферизации можно использовать обычные вакуумные установки, снабженные приводом для вращения подложки и устройством для контроля толщин наносимых слоев.

3.2.1 Физическая сущность метода

Отличительной особенностью вакуумной асферизации является то, что на пути молекулярного пучка лучей устанавливается специальная заслонка – маска, представляющая собой тонкий экран с определенным фасонным вырезом. Эта маска располагается в непосредственной близости от поверхности, и за счет фасонного выреза обеспечивается изменение толщины наносимого слоя по зонам асферизируемой поверхности.

В настоящее время точность наносимого слоя равна 0,1 мкм при толщине до 30 мкм [4].

Нанесение асферизирующего слоя производится как на выпуклые, так и на вогнутые поверхности (конечно, и на плоские) с осевой симметрией и поверхности двоякой симметрии. Этим способом можно исправлять, например, осесимметричные ошибки асферических поверхностей, полученных каким-либо другим способом.

3.2.2 Описание вакуумной установки для асферизации

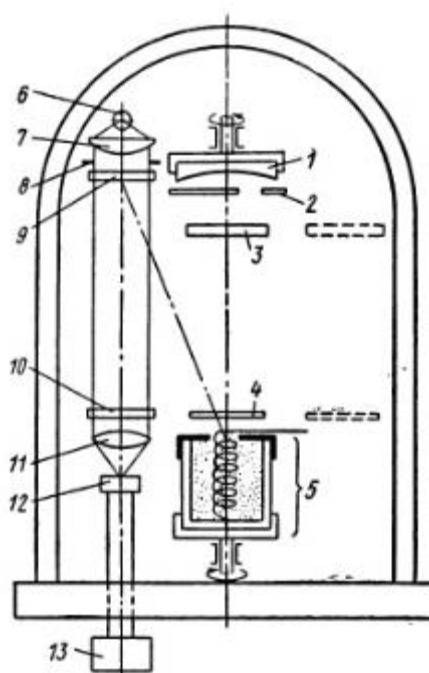


Рис. 3 - Схема установки для вакуумной асферизации

Схема установки для вакуумной асферизации показана на рис. 3. Деталь 1, подлежащая асферизации, закрепляется в цанге, приводимой в равномерное вращение магнитной муфтой, обеспечивающей герметизацию внутренней полости установки. Герметизация также может быть обеспечена сильфонной передачей.

Изменение толщины наносимого слоя по зонам асферируемой поверхности программируется маской 2.

Узел испарителя 5 выполняется в виде открытого сосуда (тигля) из вольфрама, молибдена, тантала, графита, кварца или керамики. В этот сосуд помещают вольфрамовую спираль, нагревающую возгоняемый материал.

Для очистки поверхности детали перед асферизацией используют электрод высокого напряжения 3. Контроль толщины слоя в процессе его нанесения выполняют фотометрическим устройством или вакуумным интерферометром.

На рис. 3 показано фотометрическое устройство, состоящее из

источника света 6, конденсора 7, диафрагмы 8, контрольных образцов (свидетелей) 9, размещаемых на револьверной головке, светофильтра 10, объектива 11 и фотоэлектрического приемника 12, соединенного с гальванометром 13. Все описанные узлы и устройства помещают под колпак вакуумной установки и поэтому называют подколпачной аппаратурой.

3.2.3 Принцип действия вакуумной установки

Процесс асферизации выполняют в два этапа.

1. Нанесение подслоя. Для надежного сцепления асферизирующего слоя с материалом заготовки ее необходимо нагреть до $\approx 300^{\circ}\text{C}$. Этот нагрев заготовки влечет за собой нарушение ее соосности с маской, а следовательно, искажает получаемую асферическую поверхность. Поэтому на нагретую заготовку следует предварительно нанести по возможности равнотолщинный подслоя из того же материала, что и последующий асферизирующий слой. Для этой цели используют ту же самую вакуумную установку, что и для выполнения основной операции (рис. 3), но в ней при малом диаметре детали и большом расстоянии ее от испарителя отсутствует маска и устанавливается специальный нагреватель в непосредственной близости от заготовки.

Материал подслоя может отличаться от материала асферизирующегося слоя. Он должен обеспечить хорошую адгезию как с заготовкой при повышенной температуре, так и с наносимым на него асферизирующим слоем.

Заготовку из оптического стекла или металла (магниевого сплава, стали или дюралюминия) с 14 классом шероховатости базовой поверхности после очистки закрепляют в цанге вакуумной установки. Вместе с заготовкой устанавливают контрольный образец.

При вакууме не менее $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. заготовку приводят во вращение и в течение 10 мин обрабатывают электрическим разрядом от электрода 3. Затем включают специальный нагреватель, с тем чтобы температуру заготовки довести до 300°C и выдержать ее при этой температуре в течение 30 мин, используя для контроля температуры термопару.

После этого включают спираль испарителя, который прикрыт заслонкой 4, для того, чтобы в течение 10-15 мин, повышая температуру испарителя до рабочей, обезгазить возгоняемый материал. При отведенной заслонке 4 наносят подслои со скоростью осаждения примерно 150 Å/мин (0,015 мкм/мин) до толщины 0,5 мкм, контролируемой фотометрическим устройством. Охлажденная в вакууме заготовка пригодна для нанесения асферирующего слоя.

2. Нанесение асферирующего слоя. Асферирующий слой наносится при вакууме не менее 2-10⁻⁸ мм рт. ст. Отличительной особенностью нанесения асферирующего слоя является, во-первых то, что используют маски, и, во-вторых, то, что конденсат осаждают на ненагретую заготовку.

Большое влияние на точность и воспроизводимость вакуумной асферизации оказывают соосность вращаемой заготовки, маски и испарителя, а также симметричность индикатриссы молекулярного пучка в пределах необходимого телесного угла. Последнее обеспечивается покрытием испарителя диафрагмой с круглым отверстием диаметром около 10 мм. Кроме того, для этой же цели рекомендуется применение вращающегося испарителя.

Особо важное влияние на точность вакуумной асферизации оказывает маска, конфигурация выреза которой должна учитывать протяженность источника молекулярных пучков. Рекомендуется применение маски с несколькими симметричными вырезами, что ослабляет требования к ее соосности с вращаемой заготовкой.

Для контроля толщины слоя в процессе напыления действует, как уже было указано, фотометрическое устройство. По толщине слоя, напыленного на контрольный образец без участия маски, судят о толщине слоя на асферируемой поверхности. Периодическое изменение пропускания контрольного образца (максимум-минимум) соответствует изменению его оптической толщины на четверть длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$, что отмечается гальванометром.

Из-за уменьшения максимального значения пропускания по мере увеличения толщины слоя на контрольном образце, кратного $\frac{\lambda}{4}$, приходится использовать несколько контрольных образцов, последовательно вводимых в фотометрическое устройство.

Связь между толщиной слоя на контрольном образце и на асферизуемой поверхности устанавливают экспериментально по интерференционной картине пробной заготовки с учетом показателя преломления нанесенного слоя, постоянство которого зависит от режима испарения.

По интерференционной картине опытного образца можно установить погрешности изготовления асферической поверхности. Например, эллиптичность и неконцентричность в расположении интерференционных колец могут явиться следствием неточности во взаимном положении маски и заготовки (перекосы и несоосность).

Все изложенное выше относится и к нанесению дополнительного слоя вещества путем катодного распыления при малых размерах катода (например, в виде круглого диска диаметром ~ 10 мм).

При катодном распылении равномерный по толщине слой получается, если поверхности катода и заготовки близки по размерам и форме, например параллельны. В ходе процесса можно вращать как катод, так и заготовку или маску.

Катодное распыление кварцевого стекла или металлического кремния в атмосфере кислорода при давлениях порядка $(2 - 10) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. обеспечивает получение монолитного прозрачного слоя SiO_2 .

3.3 Методика расчета распределения толщины асферизирующего покрытия по круговым зонам поверхности подложки.

При формировании АП, заготовка имеет параметры ближайшей сферы сравнения. Для расчета сферы сравнения выберу расчет радиуса сферы по четырем точкам.

3.3.1 Расчет четырехточечной сферы сравнения.

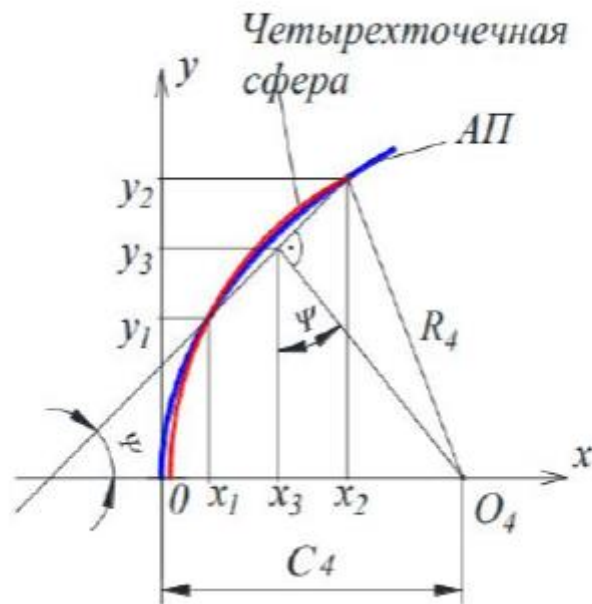


Рис. 4 - Расчет радиуса кривизны ближайшей сферы по 4-м точкам

Основные формулы для получения радиуса кривизны ближайшей сферы описаны ниже:

$$y_1 = \frac{D_0}{2}, \quad (1)$$

где, D_0 – внутренний световой диаметр.

$$y_2 = \frac{D_{св}}{2}, \quad (2)$$

где, $D_{св}$ – внешний световой диаметр.

$$y_3 = \frac{y_2 + y_1}{2} \quad (3)$$

$$x_1 = \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_2(-y_1)^2} - A_1}{-2A_2}, \quad (4)$$

где, A_1, A_2 – параметры данного уравнения.

$$x_2 = \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_2(-y_2)^2} - A_1}{-2A_2} \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{x_2 + x_1}{2} \quad (6)$$

$$\tan \psi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

$$C_4 = y_3 \cdot \tan \psi + x_3, \quad (8)$$

где, C_4 – расстояние от центра сферы до вершины.

$$R_4 = \sqrt{y_3^2(1 + \tan^2 \psi) + \frac{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}{4}}, \quad (9)$$

где, R_4 – радиус ближайшей четырехточечной сферы.

3.3.2 Расчет распределение толщины съема или нанесения материала асферической поверхности детали.

Расчет координат точек асферической поверхности можно найти из уравнения ниже:

$$y^2 = A_1x - A_2x^2 \quad (10)$$

Из уравнения 10 следует:

$$x_{\text{АП}}(y) = \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_2(-y^2)} - A_1}{2A_2} \quad (11)$$

Координаты точек ближайшей сферической поверхности можно найти по следующему уравнению:

$$y^2 = R_4^2 - (x - C_4)^2 \quad (12)$$

$$x_{сф}(y) = C_4 - \sqrt{R_4^2 - y^2} \quad (13)$$

В результате расчет линейных отступлений от сферы сравнению можно найти по следующей формуле:

$$a(y) = x_{сф}(y) - x_{АП}(y) \quad (14)$$

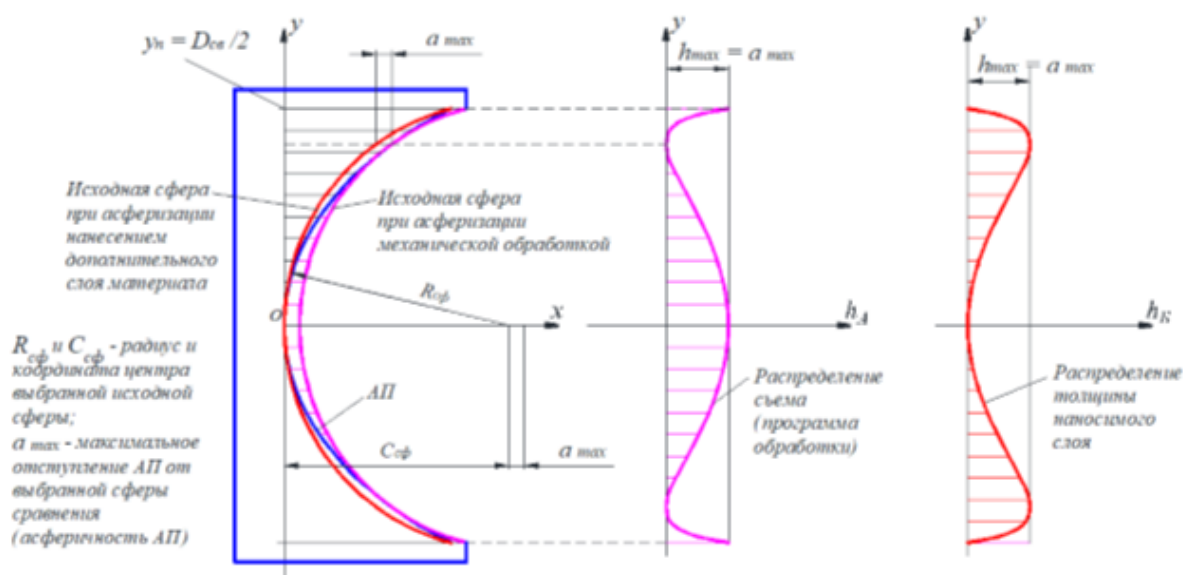


Рис. 5 - Пример графического изображения съема и толщины нанесения на заготовку

3.4 Методика расчета маски

Молекулярные пучки, образуемые термическим испарением в вакууме, аналогичны пучкам световых лучей, и для них действует закон косинусов и квадратов расстояний, который в данном случае выражается зависимостью:

$$t = k\tau \frac{\cos i}{q^2}, \quad (15)$$

где, t – толщина наносимого слоя по нормали к поверхности (уравнение 14), τ – время осаждения, i – угол падения элементарного молекулярного пучка на асферизуемую поверхность, q – расстояние от источника до данной элементарной площадки на поверхности сферической (плоской) заготовки по направлению, определяемому углом падения i , k – коэффициент пропорциональности.

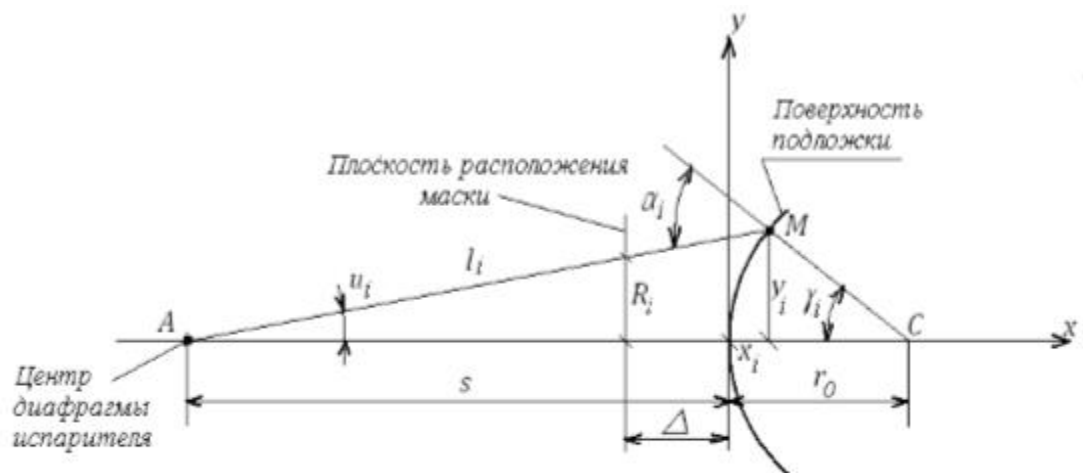


Рис. 6 - Схема для расчета угла раскрытия маски

Примем, что источник испарения является точечным. Этот случай показан на рис. 6. Исходная поверхность является сферической радиуса r_0 . Начало прямоугольной системы координат взято в точке O сферы, а ось y является касательной. Тогда уравнение меридионального сечения сферы будет следующим:

$$y^2 = r_0^2 - (r_0 - x)^2, \quad (16)$$

где, r_0 – радиус базовой сферической поверхности, на которую напыляются слои.

Точечный излучатель A находится (рис. 6) на расстоянии s от вершины

O . Ось элементарного молекулярного пучка, выходящего из точки A , образует с осью $O - x$ угол u . Точка M – точка встречи этого пучка с поверхностью сферы, $AM = L$. Угол падения α_i – угол между нормалью MC , образующей с осью x угол γ , и лучом AM . Отрезки s и L , а также углы u , γ и α_i взяты с учетом знаков принятых в оптике.

Закон распределения толщины наносимого слоя по зонам заготовки, т.е. $t(y)$ можно найти по формуле 14, то есть $t(y) = a(y)$. Взяв значения y из данного уравнения и подставляя в уравнение 17, получаем закон распределения толщины.

$$x = r_0 - \sqrt{r_0^2 - y^2} \quad (17)$$

АП вращается равномерно, поэтому время τ осаждения слоя толщиной t пропорционально углу φ_0 раскрытия маска для данной зоны y (рисунок 7). В этом случае предполагается, что маска совпадает с поверхностью базовой сферы.

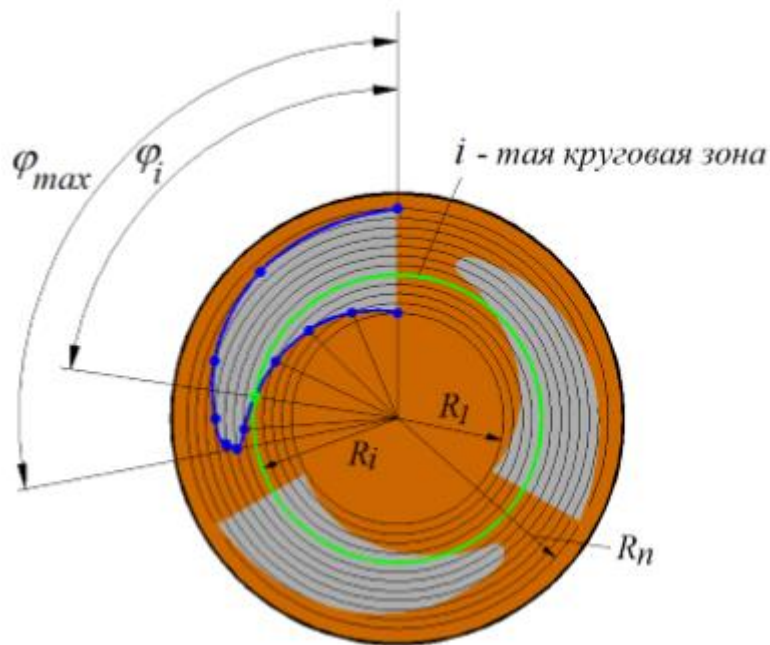


Рис. 7 - Маска для вакуумной асферизации

φ_i – угол раскрытия маска в i – ой круговой зоне;

φ_{max} – максимальный угол раскрытия маски. По конструктивным соображениям максимальный угол раскрытия должен быть меньше 360° . Если число вырезов равно N , то угол φ_{max} можно вычислить по следующей формуле 18 (с учетом того, что между вырезами должно быть некоторое расстояние в градусах).

$$\varphi_{max} = \frac{360 - P \cdot N}{N}, \quad (18)$$

где, P – расстояние в градусах между вырезами.

Для примера рассчитаю маску с 3 вырезами и расстоянием между ними 15° :

$$\varphi_{max_15} = \frac{360 - 15 \cdot 3}{3} = \frac{360 - 45}{3} = 105^\circ \quad (19)$$

R_i – радиус круговой зоны;

n – количество круговых зон.

Угол раскрытия плоской маски можно найти по следующей формуле:

$$\varphi_i = \frac{h_i(\Delta - s)(x_i - s)}{k_1 \cos(u_i - \gamma_i)} \left[\left(\frac{R_i}{\Delta - s} \right)^2 + 1 \right], \quad (20)$$

Где, h_i – толщина наносимого слоя,

Δ - расстояние между маской и вершиной линзы,

s – расстояние от центра испаряемого вещества до вершины линзы,

x_i – координата точки по оси X,

u_i – угол между осью напыления и вектором, направленным из центра испарителя в точку зоны i на поверхности линзы,

γ_i – угол между осью напыления и радиусом линзы, направленным в точку зоны i на поверхности линзы,

R_i – радиус зоны маски, соответствующей зоне i -ой поверхности линзы,
 k_1 – коэффициент, который находится по формуле 21.

$$k_1 = \frac{h_{max}(\Delta-s)(x_{max}-s)}{\varphi_{max} \cdot \cos(u_{max}-\gamma_{max})} \left[\left(\frac{R_{max}}{\Delta-s} \right)^2 + 1 \right], \quad (21)$$

где, φ_{max} – максимальный угол раскрытия маски,

R_{max} – радиус круговой зоны в точке максимального раскрытия маски,

h_{max} – толщина максимального наносимого слоя,

Δ – расстояние между маской и вершиной линзы,

s – расстояние от центра испаряемого вещества до вершины линзы,

x_{max} – координата точки по оси X, соответствующая максимальному углу раскрытия маски,

u_{max} – угол между осью напыления и вектором, направленным из центра испарителя в точку зоны i на поверхности линзы,

γ_{max} – угол между осью напыления и радиусом линзы, направленным в точку зоны i на поверхности линзы.

Дополнительные формулы для расчета:

$$u_i = \text{atan} \left(\frac{y_i}{x_i-s} \right) \quad (22)$$

$$\gamma_i = \text{asin} \left(\frac{y_i}{r_o} \right) \quad (23)$$

$$R_i = \frac{y_i(\Delta-s)}{x-s} \quad (24)$$

$$\cos i_i = \cos(u_i - \gamma_i) \quad (25)$$

$$q = y^2 + (x - s)^2 \tag{26}$$

4. Практическая часть

Для чертежа линзы воспользуемся библиотекой для бесплатного программного обеспечения КОМПАС-3D LT V12 «Библиотека проектирования оптики».

Проектирование конструкции линзы

Конструктивные параметры	
Радиус А	9.772
Радиус Б	18.621
Св. диаметр А	11.5
Св. диаметр Б	13.42
Полный диаметр	0
Толщина по оси	3.81
Материал	K8
n	1.5183

Допуски	
Полный диаметр	c11
Толщину вдоль оси	0.1
Децентрировку	0.03

Фаски...

Задать требования к установке...

Тип крепления

Тип ОС

Поверхность А	
Характеристика	<input type="text"/>
Покрытие	<Нет>
Шероховатость	Rz0.05

Поверхность Б	
Характеристика	<input type="text"/>
Покрытие	<Нет>
Шероховатость	Rz0.05

Рассчитать доп. параметры

Отчет...

Базовая поверхность

А ☒

Б ☐

Неуказанная шероховатость

2.5

Формат

А4 ☒ А3 ☐

Чертеж

Отмена

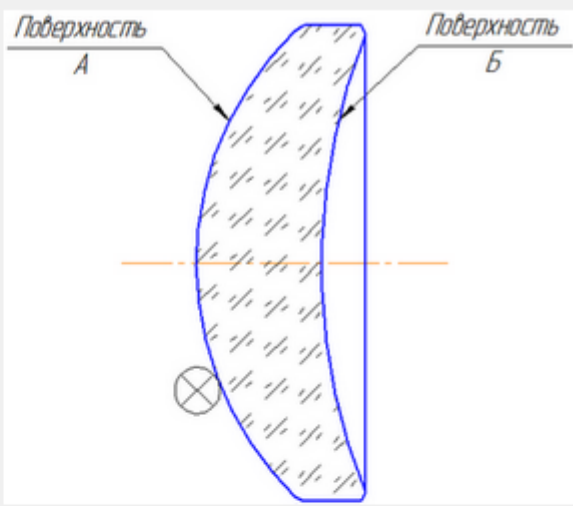


Рис. 8 - Окно библиотеки проектирования оптики

Для правильного функционирования библиотеки необходимо заполнить

основные поля окна. В группу конструктивных параметров входят следующие основные характеристики:

1. Радиус поверхности А – радиус кривизны внешней поверхности
2. Радиус поверхности В – радиус кривизны внутренней поверхности
3. Световой диаметр – диаметр, согласно входным параметрам из Главы 2
4. Световой диаметр поверхности В – либо аналогичен 3, либо немного меньше, если есть фаска
5. Полный диаметр – полный диаметр линзы
6. Толщина по оси – толщина линзы по оси прохождения светового луча, значение берется из Главы 2.
7. Материал – материал из которого сделана линза (для ультрафиолетовой области возьму УФС1)
8. Коэффициент преломления (для стекла УФС1 согласно [35] $n_e(n_D) = 1.540$)

Первоначально из параметров уравнения поверхности АП необходимо найти радиус кривизны основной поверхности. Согласно [6] уравнение поверхности АП имеет вид:

$$y^2 = Az + Bz^2 = 2r_0 - (1 - e^2)z^2, \quad (27)$$

где, r_0 – радиус кривизны поверхности, e – эксцентриситет.

Из уравнения 27 можно получить радиус кривизны поверхности:

$$A = 2r_0 \rightarrow r_0 = \frac{A}{2} \quad (28)$$

Из уравнения 28 радиус кривизны поверхности АП в вершине равен $r_0 = \frac{642}{2} = 321$.

4.1 Чертеж оптической детали

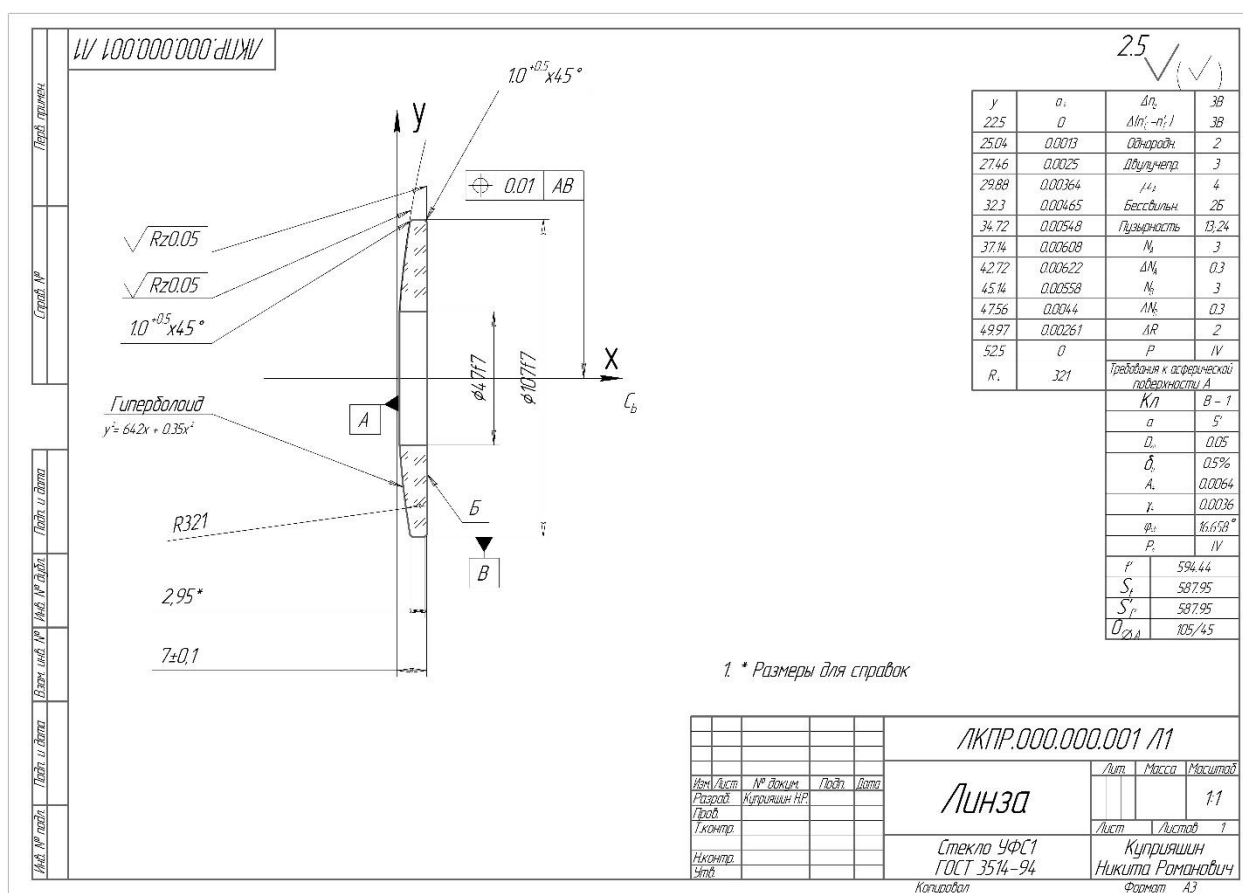


Рис. 9 - Чертеж линзы

4.1.1 Таблица параметров к чертежу

В таблицу параметров входят следующие компоненты:

1. Δn_e – показатель преломления
2. $\Delta(n_{F'} - n_{C'})$ - коэффициент дисперсии
3. Оптическая однородность
4. Двулучепреломление
5. μ_A – показатель ослабления излучения источника А
6. Бессвильность стекла или свилеподобные дефекты в кристаллах
7. Пузырность
8. $N_{A/B}$ – предельное отклонение стрелки кривизны поверхности

детали от стрелки кривизны поверхности пробного стекла или допускаемая

сферичность плоской поверхности

9. ΔN – поле допуска формы поверхности
10. ΔR – класс точности пробного стекла по ГОСТ 2786-82 или предельное отклонение от значения расчетного радиуса поверхности, %
11. P – класс чистоты полированной поверхности
12. Обозначения, относящиеся к АП:
13. R_i ($i = 1 \dots 4$) - расчетное значение радиуса выбранной сферы сравнения;
14. a_i ($i = 1 \dots 4$) - зональные отступления АП от выбранной сферы сравнения;
15. Кл - технологический класс АП;
16. α - допустимое угловое отклонение нормали к АП
17. $D_{кр}$ - максимальный допустимый диаметр кружка размытия в изображении точки
18. d_r - допустимая относительная погрешность параметра АП
19. A_i ($i = 1 \dots 4$) – расчетное значение асферичности АП по отношению к выбранной сфере сравнения
20. γ_i ($i = 1 \dots 4$) - расчетное значение максимального градиента асферичности АП по отношению к выбранной сфере сравнения
21. $\varphi_{св}$ - расчетное значение крутизны АП

Крутизна – параметр АП, характеризующий угол наклона нормали в крайней точке асферической поверхности к ее оси.

Асферичность – величина снимаемого или напыляемого на ближайшую сферу вещества.

Градиент асферичности – изменение величины асферичности на 1 мм дуги осевого сечения поверхности.

Крутизну АП найду из следующих соображений:

1. Крутизна характеризуется углом наклона между осью X и нормалью к поверхности в крайней точке АП.

2. Если провести касательную к АП в данной точке, то можно найти угол касательной, зная, что нормаль к поверхности и к касательной находится под углом 90 градусов можно найти угол нормали относительно оси X.

Угол нормали можно найти из следующих соображений:

$$\tan w = f'(x_0), \quad (29)$$

где, $\tan w$ – тангенс угла наклона касательной в данной точке, $f'(x_0)$ – значение производной формообразующей поверхности в точке x_0 ($x_0 = x_2$).

$$(\sqrt{642x + 0.35x^2})' = \frac{7x}{2\sqrt{\frac{7x^2}{20} + 642x}} + \frac{321}{\sqrt{\frac{7x^2}{20} + 642x}} \quad (30)$$

Из уравнения 30 следует, что тангенс угла наклона касательной равен:

$$\begin{aligned} \tan w &= \frac{7x_2}{2\sqrt{\frac{7x_2^2}{20} + 642x_2}} + \frac{321}{\sqrt{\frac{7x_2^2}{20} + 642x_2}} = \frac{7*4.283}{2\sqrt{\frac{7*4.283^2}{20} + 642*4.283}} + \\ &\frac{321}{\sqrt{\frac{7*4.283^2}{20} + 642*4.283}} = \frac{30}{105} + \frac{321}{105} = 0.285 + 3.057 = 3.342 \end{aligned} \quad (31)$$

Откуда угол касательной равен:

$$w = \text{atan } 3.342 = 73.342^\circ \quad (32)$$

Угол нормали между осью X и касательной будет являться также углом между АП и нормалью в данной точке, найду следующим образом:

$$180^\circ - (73.342^\circ + 90^\circ) = 16.658^\circ \quad (33)$$

4.1.2 Информация об основном чертеже

На чертеже линзы помимо таблицы параметров изображена основная информация о поверхности линзы, ее размерах и т.д.

$\sqrt[2.5]{(\sqrt{\quad})}$ - шероховатость поверхностей детали на чертеже

$\sqrt{Rz0.05}$ – наибольшая высота профиля шероховатости для данной поверхности

Кверху от оси на стрелке-выноске размещается позиционный допуск (децентрировка).

4.2 Результаты расчетов

4.2.1 Расчет распределения толщины напыления

Рассчитаю радиус кривизны и расстояние до вершины четырехточечной сферы по формулам 1-9.

$$y_1 = \frac{D_0}{2} = \frac{45}{2} = 22.5 \quad (34)$$

$$y_2 = \frac{D_{CB}}{2} = \frac{105}{2} = 52.5 \quad (35)$$

$$y_3 = \frac{y_2 + y_1}{2} = \frac{52.5 + 22.5}{2} = 37.5 \quad (36)$$

$$x_1(y_1) = \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2 y_1^2}}{2A_2} = 0.78821 \quad (37)$$

$$x_2 = \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2 y_2^2}}{2A_2} = 4.283 \quad (38)$$

$$x_3 = \frac{x_2 + x_1}{2} = 2.5357 \quad (39)$$

$$\tan \Psi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = 8.583 \quad (40)$$

$$C_4 = y_3 \tan \Psi + x_3 = 324.423 \quad (41)$$

$$R_4 = \sqrt{y_3^2 (1 + \tan^2 \Psi) + \frac{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}{4}} = 324.416 \quad (42)$$

Найду координаты точек АП из уравнения 10:

$$x_{\text{АП}}(y) = \frac{-A_1 + \sqrt{A_1^2 - 4A_2 y^2}}{-2A_2}, \quad (43)$$

где, $0 \leq y \leq \frac{D_{\text{св}}}{2}$.

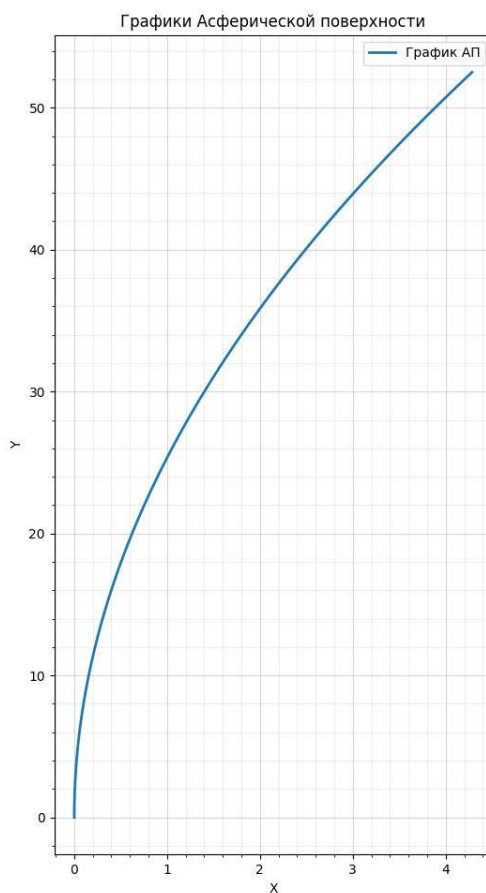


Рис. 10 - График половины асферической поверхности

Аналогично рассчитаю значения $x_{\text{сф}}(y)$ для ближайшей сферы и построю график. Радиус ближайшей сферы $R = 324.416$, расстояние до вершины $C = 324.423$. Значения x можно найти по уравнению 13.

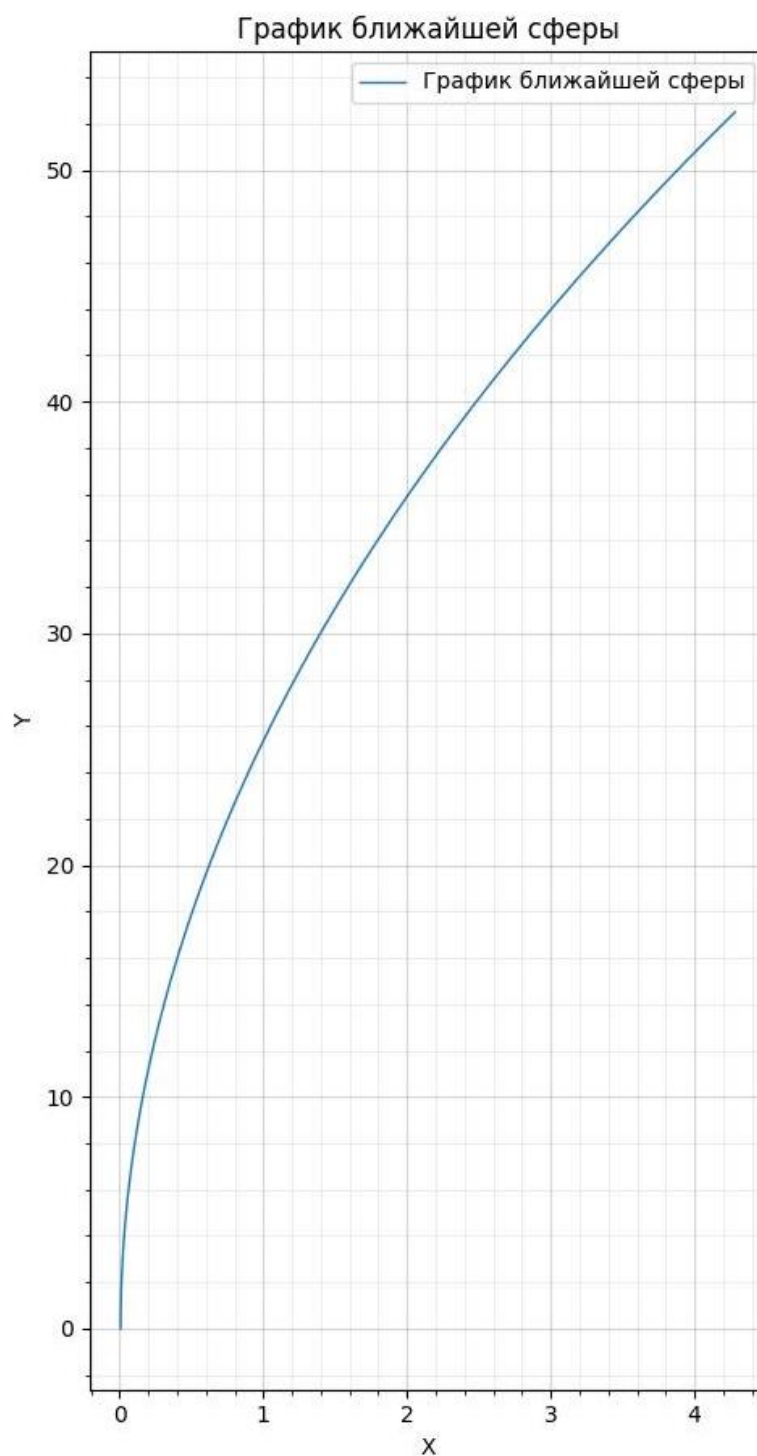


Рис. 11 - График половины ближайшей сферы

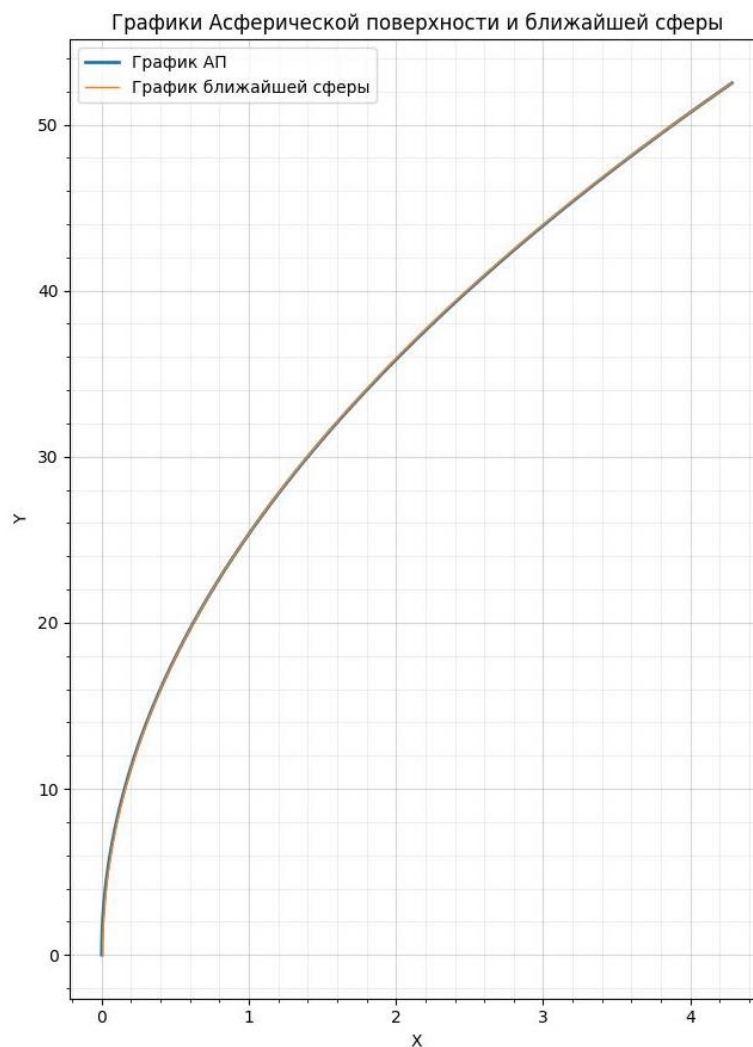


Рис. 12 - График пересечения АП со сферой сравнения

Код для построения представлен в приложении 1. Язык программирования Python 3.10 среда разработки PyCharm Community Edition 2022.3.1

Расчет толщины наносимого слоя производится по формуле 14. Графическое представление толщины наносимого слоя представлено на рисунке ниже.

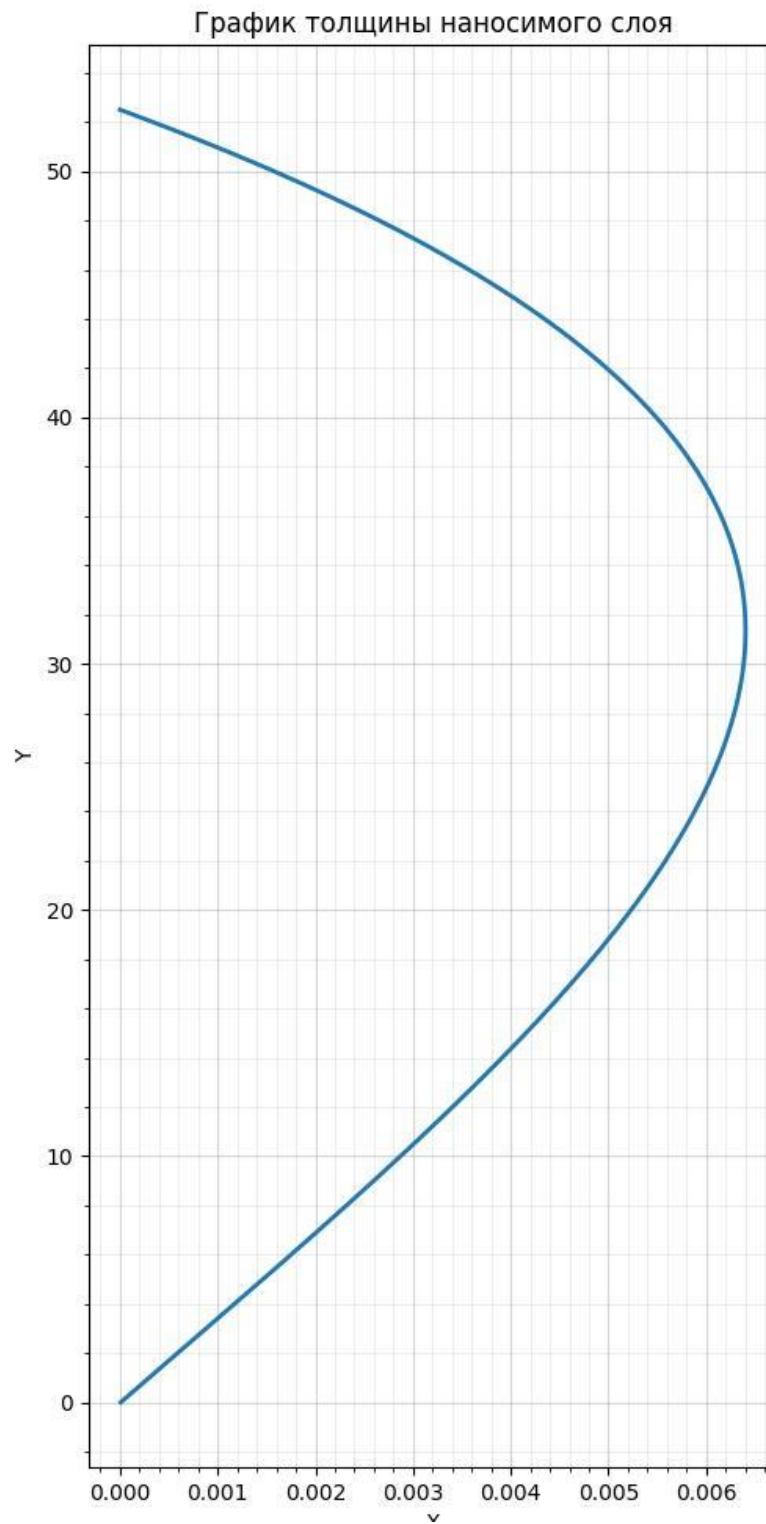


Рис. 13 - График толщины нанесения дополнительного слоя

Максимальная величина нанесения $a_{max} = 0.006403$ мм.

4.2.2 Расчет маски

Первостепенно необходимо найти максимальный угол φ_{max} по формуле 18 при количестве вырезов 4 и углом между ними 10° :

$$\varphi_{max} = \frac{360 - P \cdot N}{N} = \frac{360^\circ - 10^\circ \cdot 4}{4} = 80^\circ \quad (44)$$

Для начала найду коэффициент k_1 :

$$k_1 = \frac{t_{max} \cdot (\Delta - s)(x_{max} - s)}{\varphi_{max} \cdot \cos(u_{max} - \gamma_{max})} \left[\left(\frac{R_{max}}{\Delta - s} \right)^2 + 1 \right], \quad (45)$$

где, t_{max} – максимальное значение из диапазона толщин, найденных по формуле 13, Δ – расстояние между поверхностью напыления и маской, S – расстояние от излучателя до вершины АП, x_{max} – максимальное значение из диапазона, найденного по формуле 17, φ_{max} – максимальный угол раскрытия маски по формуле 40, u_{max} – угол, определяемый формулой 22 при максимальном значении Y , γ_{max} – угол, определяемый формулой 23 при максимальном значении Y , R_{max} – радиус кривизны при x_{max} и u_{max} .

Параметры рассчитываются с помощью Python. Код программы представлен в приложении 1.

По формуле 41, подставив рассчитанные значения найду коэффициент k_1 :

$$k_1 = \frac{t_{max} \cdot (\Delta - s)(x_{max} - s)}{\varphi_{max} \cdot \cos(u_{max} - \gamma_{max})} \left[\left(\frac{R_{max}}{\Delta - s} \right)^2 + 1 \right] = \frac{0.006403(50 - 480)(4.276 - 480)}{1.396 \cos(0.1099 - 0.163)} \left[\left(\frac{47.454}{50 - 480} \right)^2 + 1 \right] = 950.892 \quad (46)$$

Углы можно найти по формуле 20 (для примера найду φ_0):

$$\varphi_0 = \frac{h_0(\Delta - s)(x_0 - s)}{k_1 \cos(u_0 - \gamma_0)} \left[\left(\frac{R_0}{\Delta - s} \right)^2 + 1 \right] = \frac{0 \cdot (50 - 480) \cdot (4.28 - 480)}{950.891 \cdot \cos(0.110 + 0.163)} * \left[\left(\frac{-47.454}{50 - 480} \right)^2 + \right.$$

$$1 \Big] \approx 0 \quad (47)$$

Расчет остальных углов и радиус векторов рассчитаны при помощи Python, код представлен в приложении 1.

4.3 Чертеж маски

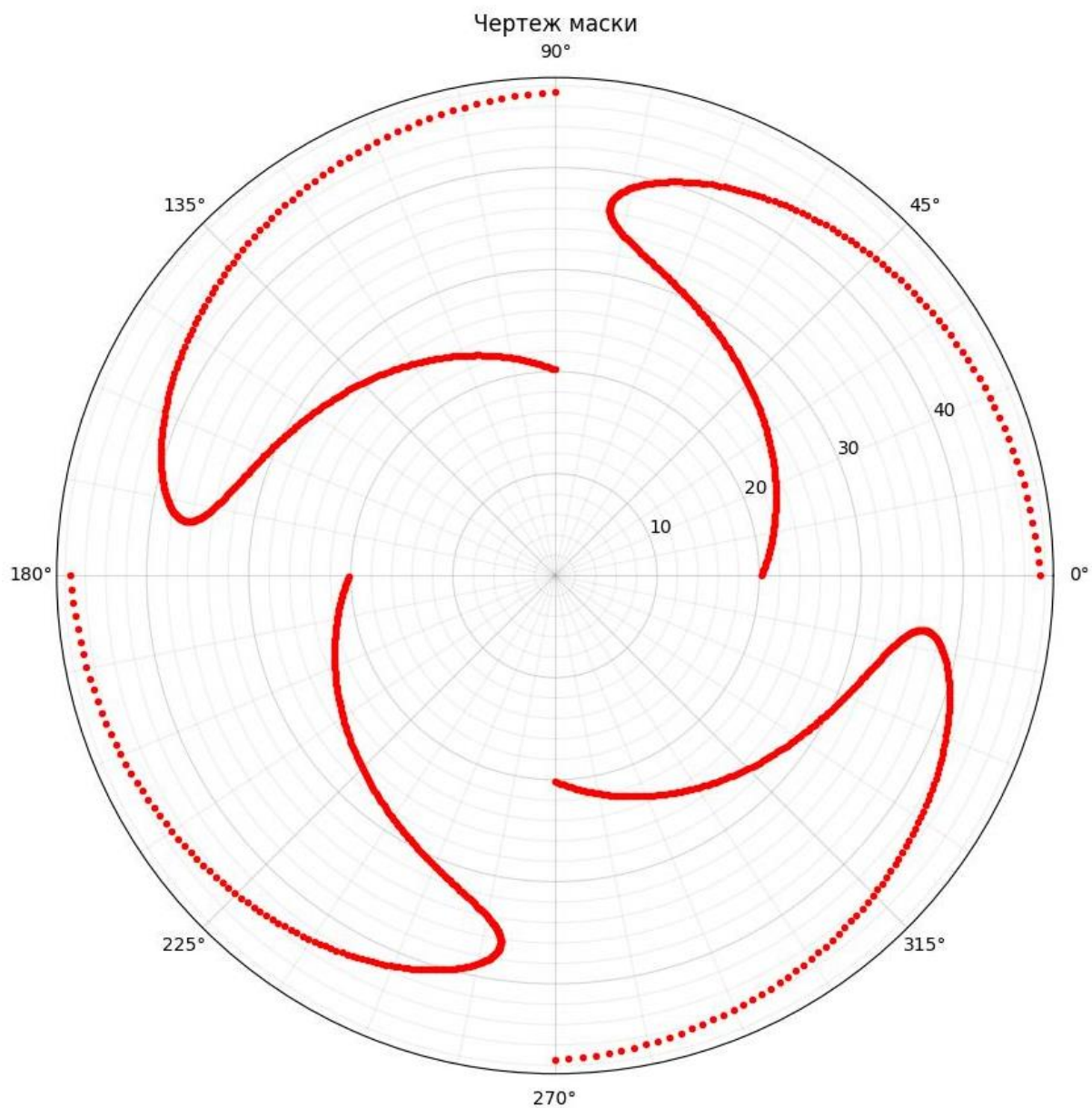


Рис. 14 - Чертеж маски в полярных координатах

5. Выводы

При выполнении данной курсовой работы автор был ознакомлен с основными ГОСТами для построения чертежей оптических деталей и чтению информации из них. Основные ГОСТы представлены в главе 1.

Автором были изучены основные методы получения асферических поверхностей, более конкретно проработан метод вакуумной асферизации: изучена его физическая сущность, исследована промышленная установка для реализации данного метода, а также изучен принцип действия данной установки.

Автор данной работы изучил основные методики расчетов ближайших сфер сравнения, при помощи которых рассчитывается асферическая поверхность нужной линзы, в частности на более высоком уровне изучена методика расчета четырехточечной ближайшей сферы сравнения.

Для расчета маски для асферизации вакуумным методом построен чертеж АП с основными параметрами, после чего произведен расчет толщины наносимого слоя и рассчитана и визуализирована сама маска в полярных координатах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Заказнов Н.П. Изготовление асферической оптики / Н.П. Заказнов, В.В. Горелик. – М.: Машиностроение, 1978
2. Основы формообразования оптических поверхностей: курс лекций / В.И. Каширин. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006
3. Черезова Л.А. Ионно-лучевые методы в оптической технологии / Л.А. Черезова. – СПб : СПб ГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
4. Заказнов Н. П., Горелик В. В. Изготовление асферической оптики. М., «Машиностроение», 1978. 248с
5. Зверев В.А., Е.В. Кривопустова, Т.В. Точилина. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. Часть 2. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 248 с.
6. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Прикладная теория аберраций. Часть вторая. – Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. - 52 с.
7. Цуканова Г.И., Бахолдин А.В. Специальные разделы прикладной оптики. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А. – СПб: СПб ГУИТМО, 2007. – 77с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

```
import sys

sys.path.insert(1, 'venv/Lib/site-packages')

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Входные параметры
A1 = 642
A2 = -0.35
R = A1 / 2
C = 321.852
D_SV = 105
y = np.linspace(0, D_SV / 2, 500)
D0 = 45
S = 480
delta = 50

# Расчет параметров ближайшей сферы по четырем точкам:

y1 = D0 / 2
y2 = D_SV / 2
y3 = (y2 + y1) / 2
print(f'-----\n'
      f'y1: {y1}\ny2: {y2}\ny3: {y3}')

x1 = (-(np.sqrt(-(4 * A2 * (y1 ** 2)) + A1 ** 2)) + A1) / (2 * A2)
x2 = (-(np.sqrt(-(4 * A2 * (y2 ** 2)) + A1 ** 2)) + A1) / (2 * A2)
x3 = (x2 + x1) / 2
```

```
print(f'-----\n'
      f'x1: {x1}\nx2: {x2}\nx3: {x3}')
```

```
tanFI = (y2 - y1) / (x2 - x1)
```

```
print(f'-----\n'
      f'tan_fi: {tanFI}')
```

```
C = y3 * tanFI + x3
```

```
print(f'C: {C}')
```

```
R = np.sqrt(((y3 ** 2) * (1 + tanFI ** 2)) + ((y2 - y1) ** 2 + (x2 - x1) ** 2) /
```

4)

```
print(f'R: {R}')
```

Нахождение точек "X" АП и ближайшей сферы с построением графиков:

```
X_ap = (- (np.sqrt(-(4 * A2 * (y ** 2)) + A1 ** 2)) + A1) / (2 * A2)
```

```
X_blig_sf = (C) - np.sqrt(R ** 2 - y ** 2)
```

```
# plt.title('Графики Асферической поверхности и ближайшей сферы')
```

```
# plt.xlabel('X')
```

```
# plt.ylabel('Y')
```

```
# plt.minorticks_on()
```

```
# plt.grid(which='minor', alpha=0.2)
```

```
# plt.grid(which='major', alpha=0.5)
```

```
# plt.plot(X_ap, y, linewidth = 2)
```

```
# plt.plot(X_blig_sf, y, linewidth = 1)
```

```
# plt.legend(['График АП', 'График ближайшей сферы'])
```

```
# plt.show()
```

```
# Расчет толщины наносимого слоя:
```

```
t = -X_blig_sf + X_ap
```

```
# очищаю толщину от отрицательных значений
```

```
t_izm = []
```

```
for tolsh in t:
```

```
    if tolsh < 0:
```

```
        t_izm.append(0)
```

```
    else:
```

```
        t_izm.append(tolsh)
```

```
t = t_izm
```

```
del t_izm
```

```
print(f'-----\n'
```

```
      f'Толщина наносимого слоя: {t}')
```

```
# plt.title('График толщины наносимого слоя')
```

```
# plt.xlabel('X')
```

```
# plt.ylabel('Y')
```

```
# plt.minorticks_on()
```

```
# plt.grid(which='minor', alpha=0.2)
```

```
# plt.grid(which='major', alpha=0.5)
```

```
# plt.plot(t, y, linewidth=2)
```

```
# # plt.legend(['График АП', 'График ближайшей сферы'])
```

```
# plt.show()
```

```
# Максимальное значение толщины:
```

```
t_max = max(t)
```

```
print(f'Максимальная толщина наносимого слоя: {round(t_max, 6)}')
```

```

# Расчет коэффициента k1:

x = []
for _ in y:
    x.append(R - np.sqrt(R ** 2 - _ ** 2))
print(f'-----\n'
      f'Координата X ОД для расчета маски: {x}')

fi_max = 1.3962634016 # радиан или 80 градусов
x_max = R - np.sqrt(R ** 2 - max(y) ** 2)
u_max = -((np.arctan(max(y) / (x_max - S))))
way_max = (np.arcsin(max(y) / R))
r_max = ((delta - S) * max(y)) / (x_max - S)

print(f'-----\n'
      f'Максимальный угол раскрытия: {fi_max} радиан')
print(f'Максимальное значение X: {x_max}')
print(f'Максимальное значение u: {u_max} радиан')
print(f'Максимальное значение way: {way_max} радиан')
print(f'Максимальное значение r: {r_max}')

k1 = ((t_max * (delta - S) * (x_max - S)) / (fi_max * np.cos(u_max -
way_max))) * ((r_max / (delta - S)) ** 2 + 1)
print(f'-----\n'
      f'Коэффициент k1:{k1}')

# Расчет fi углов маски:
fi_ = []
R-fi = []

```

```

for _ in range(0, 500):
    r0 = (y[_] * (delta - S)) / (x[_] - S)
    h0 = t[_]
    u0 = np.arctan(y[_] / (x[_] - S))
    way0 = np.arcsin(y[_] / R)
    fi = (((h0 * (delta - S) * (x[_] - S)) / (k1 * np.cos(u0 - way0))) * ((r0 / (delta
- S)) ** 2 + 1))
    if fi > 0:
        fi_.append(fi)
        R_.fi.append(r0)
        plt.polar(fi + (90 * np.pi * 0 / 180), r0, 'r.')
        plt.polar(fi + (90 * np.pi * 1 / 180), r0, 'r.')
        plt.polar(fi + (90 * np.pi * 2 / 180), r0, 'r.')
        plt.polar(fi + (90 * np.pi * 3 / 180), r0, 'r.')

print(f'-----\n'
      f'Радиус векторы для углов: {R_.fi}')
print(f'УГЛЫ: {fi_}')

# чертеж маски

plt.minorticks_on()
plt.grid(which='minor', alpha=0.2)
plt.grid(which='major', alpha=0.5)
plt.title('Чертеж маски')
plt.show()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

```
-----
y1: 22.5
y2: 52.5
y3: 37.5
-----
x1: 0.7882126982240477
x2: 4.283222587993123
x3: 2.5357176431085855
-----
tan_fi: 8.583666698002443
tan_fi (сам угол): 83.35497756491074

C: 324.42321881820016
R: 324.4161943958362
-----
Толщина наносимого слоя: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Максимальная толщина наносимого слоя: 0.006404
-----
Координата X ОД для расчета маски: [0.0, 1.70602348816]
-----
Максимальный угол раскрытия: 1.3962634016 радиан
Максимальное значение X: 4.2761981656291255
Максимальное значение u: 0.10991338391846611 радиан
Максимальное значение way: 0.16254396425573725 радиан
Максимальное значение r: 47.454005691856814
-----
Коэффициент k1: 950.9333044459756
-----
Радиус векторы для углов: [20.202637722992, 20.2973533]
Углы: [0.0016777804743824205, 0.013426339082495043, 0.0]

Process finished with exit code 0
```

Рис. 15 - Пример выдачи результата программой расчета